第 37 卷第 6 期 2017 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.6 Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201510312200

赵慧颖,田宝星,宫丽娟,曲辉辉,季生太,李秀芬,张兴林.近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应.生态学报,2017,37(6):1900-1911.

Zhao H Y, Tian B X, Gong L J, Qu H H,Ji S T, Li X F, Zhang X L.Climate-induced potential productivity of forest vegetation during the past 308 years in northern Da Hinggan Mountain region, China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):1900-1911.

近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应

赵慧颖[1,*],田宝星[1],宫丽娟[1],曲辉辉[1],季生太[1],李秀芬[1],张兴林[2]

1 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030

2 黑龙江省富裕县气象局, 富裕 161000

摘要:揭示大兴安岭北部气候变化敏感区的气候生产潜力演变及其影响机理,对于维持东北地区生态系统平衡具有重要意义。基于标准树轮年表反演气象资料与研究区 13 个气象站观测数据组成的 1707—2014 年气象资料序列,利用 Miami 模型和小波分析等方法,分析了大兴安岭北部气候生产潜力演变及其对气候变化的响应。结果显示:1707 年以来,气温、降水、蒸散和标准气候生产潜力变化均表现极显著增加趋势,标准气候生产潜力(W)变化率为 1.79 kg hm^{-2} a^{-1},20 世纪气候倾向率最大为 10.14 kg hm^{-2} a^{-1},温度气候生产潜力(W_T)与降水气候生产潜力(W_R)的比值 21 世纪最大,水热配比状态最好;4 种气候生产潜力存在不同时间尺度的周期变化,但变化一致性较好,主周期均为 215—219a;大兴安岭北部 W 呈现一致的正变化趋势,高值、次高值、低值中心分别在根河、塔河、鄂伦春偏南地区,振幅由西北向东南逐渐递减;W 与年气温、降水量、蒸散量正相关显著,年平均气温每升高 1℃、年降水量和蒸散量均增加 10 mm,W 变化率依次为 453.71、74.40、219.01 kg/hm^2,且气温是影响 W 的主要因子;未来"暖湿型"气候对森林植被生长有利,而"冷干型"气候对森林植被生长不利,气候生产潜力增加(减少)幅度均为10.9%—21.7%。研究结果不仅可为区域尺度内研究森林植被气候生产潜力提供基础方法,而且对进一步估算森林碳汇、即将实施的碳交易及中国北部边疆生态安全研究和生态功能规划制定等具有重要参考价值。

关键词:森林植被;Miami 模型;气候生产潜力;气候变化

Climate-induced potential productivity of forest vegetation during the past 308 years in northern Da Hinggan Mountain region, China

ZHAO Huiying[1,*], TIAN Baoxing[1], GONG Lijuan[1], QU Huihui[1],JI Shengtai[1], LI Xiufen[1], ZHANG Xinglin[2]

1 *Heilongjiang Institute of Meteorological Sciences*, *Harbin* 150030, *China*

2 *Fuyu-county Meteorological Bureau*, *Fuyu* 161000,*China*

Abstract: Understanding the evolution and mechanisms of climate-induced potential productivity in the climate change sensitive regions of northern Da Hinggan Mountain are fundamental for maintaining the ecosystem balance of northeastern China. The present study employed a meteorological data series from 1707 to 2014 by using standard tree-ring chronology data collection methods and observations from 13 weather stations in northern Da Hinggan Mountain region. Using a Miami model and wavelet analysis, we analyzed the evolution of climate-induced potential productivity and its response to climate change. Results show that four types of climate-induced potential productivity (air temperature, precipitation, evapotranspiration, and standard climate-induced potential productivity (W)) have increased significantly ($P \leqslant 0.001$)

基金项目:国家自然科学基金(41165005,40865005); 黑龙江省气象局重点项目(HQZD2015002)联合资助

收稿日期:2015-10-31; **网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaohhyy2008@ aliyun.com

since 1707. W has increased at a rate of 1.79 kg hm^{-2} a^{-1} in this region since 1707. During the 20th century, the change rate of W caused by climate change peaked at 10.14 kg hm^{-2} a^{-1}. During the 19th century, the change rate of W caused by climate change reached a minimum of 0.50 kg hm^{-2} a^{-1}. These values of W were in the mid-range for the 18^{th}(0.66 kg hm^{-2} a^{-1}) and the 21^{st}(4.79 kg hm^{-2} a^{-1})) centuries. The value of W for the analyzed centuries was ranked as the 21st>20th>18th>19th century. The ratio of temperature potential productivity (W_T) to precipitation potential productivity (W_R) peaked in the 21st century; this century also experienced the highest correlation between precipitation and temperature. The different time scales in the four types of climate-induced potential productivity changed periodically in the wavelet analysis, but was relatively consistent. The first major periodic oscillation of the wavelet analysis was 215—219 years, and other major periodic oscillations in wavelet analysis were at 138, 138, 136, 138 years. W showed a consistently positive trend in northern Da Hinggan Mountain, high, sub-high, and low values of W in Genhe, Tahe, and southern Elunchun Counties of northern Da Hinggan Mountain, respectively. That is, the amplitude of the W gradually decreased from northwest to southeast. Therefore, the geographical environment greatly influenced the value of W as it varied significantly across the region. Climate-induced potential productivity was relatively high in the region with a good correlation between temperature and precipitation. The regional ecosystems are obviously dominated by forest vegetation with lush growth in northern area where the original forest landscape remained more intact than in the south where secondary forest vegetation is dominant. In addition, W was significantly positively correlated with annual air temperature, precipitation, and evapotranspiration. A 1℃ increase in mean annual air temperature and 10 mm increase in annual precipitation and evapotranspiration could induce an increase in W by 453.71, 74.40, 219.01 kg/hm^2 in standard climate-induced potential productivity, respectively. Overall, air temperature is the main factor influencing any change in W. In the future, a warm-wet climate will be beneficial for the growth of forest vegetation, whereas a cold-dry climate will be unfavorable. Climate change is expected to create a warmer-wetter climate in northern Da Hinggan Mountain region, which could increase the potential productivity. If the temperature increases (or decreases) 1—2℃, precipitation increase would be expected to increase (or decrease) 10%—20%, and the potential productivity based on climatic conditions would increase (or decrease) within a range of 10.9 to 21.7%. These results may provide a basic method for studying potential productivity based on climate change for forest vegetation at regional scales, and an important reference value for future estimations of forest carbon-sinks, implementing carbon trade in the near future, studying ecological security, and formulating ecological function planning in China′s northern border.

Key Words: forest vegetation; miami model; climate-induced potential productivity; climate change

森林生态系统是地球陆地生态系统的重要组成部分,与陆地其它生态系统相比,森林生态系统具有更高的生产力和生物量以及经济价值,不仅在维护区域生态环境上起着无可替代的重要作用,而且在全球碳平衡中也有着举足轻重的巨大贡献[1-4]。森林碳储量和植被生产力既是评价森林生态系统的结构和功能协调性的重要指标,也是评估森林生态系统碳平衡的基础[5]。植被气候生产潜力是指在其他条件均适宜的情况下,自然生长发育的植被由气候资源所决定的在单位时间单位面积上由光合作用产生的生物学产量或经济产量[6-8]。研究植被的气候生产潜力,除了能揭示生产力与气候因素的关系,预测植被在某一地区发展的潜在能力外,还可根据全球气候变化的趋势,预测植被生产力的未来发展[9]。因此,成为 PAGES 凝练的未来 10 年重点研究的 4 组科学问题重要议题之一,即过去人类-气候-生态系统相互作用研究议题的重点问题的核心内容。研究历史时期人类与气候变化、生态系统演变过程之间的相互作用机理[10],对于区域林业生产布局,生态系统管理、气候资源的充分利用、植物产量的提高和全球气候变化的应对均具有重要的指导意义[11-12]。

关于气候生产潜力研究,国外起步较早,在国际生物学计划(IBP)和国际地圈-生物圈计划(IGBP)的倡导和推动下,一些国际著名学者[13-14]开始了艰苦卓绝的试验研究,全球性气候生产潜力估测模型应运而生,最经典的、适合不同植被、不同尺度应用的模拟模型首推 Miami 模型、Thornthwaite Memorial 模型和 Chikugo 模

型,成为模拟全球性植被生产力分布及其对气候变化可能响应的代表。而国内虽然起步稍晚,但是国内有学者[15-17]将这些模型利用到了极致,应用到不同植被、不同区域尺度上的气候生产潜力分析。这些工作为开展我国植被气候生产潜力研究起到了致关重要的作用,也为深入揭示大兴安岭高纬度寒冷地区森林植被气候生产潜力的演变规律打下了坚实的理论基础和技术支撑。

大兴安岭地区是国家一级自然生态保护区,为欧亚大陆多年冻土的南缘,地处“东北亚”环境敏感区的高寒区。林业资源丰富,是我国唯一的、面积最大的、保存最完整的原始寒温带明亮针叶林区,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var.*mongolica*)及白桦(*Betula platyphylla*)为建群种,在土壤、干扰状况、气候和植被等方面与我国其他林区相比有着许多独特之处。以往对大兴安岭北部地区的气候生产潜力研究较少,受高纬度资料密度和资料序列长度限制,对基于气候资源的气候生产潜力成果缺乏系统性与全面性。因此,本文基于树轮宽度资料重建的大兴安岭北部1707—2014年年平均气温、降水量和蒸散量资料序列,对大兴安岭北部森林植被气候生产潜力时空特征进行较系统的分析,进一步确定其百年尺度的变化规律及对气候变化的响应。旨在加深对这一高寒区域林业生态、经济功能价值的全面认识[18],不仅为整个高纬度地区的森林植被气候生产潜力研究提供基础方法,而且对进一步估算森林碳汇、即将实施的碳交易及中国北部边疆国土安全、生态安全研究与经济发展规划制定等具有重要的科学指导作用。

1 材料与方法

1.1 资料获取与区域概况

本研究区域为大兴安岭北部(49°12′—53°33′N,120°11′—127°27′E)林区(图1),具体界线为:东北、北部以黑龙江为界,西北、西部以额尔古纳河为界,隔江、河与俄罗斯的东西伯利亚和远东地区毗邻,东南部达黑河-嫩江一线附近,与小兴安岭相接。在植被区划上,是独立的寒温带针叶林区[19],土壤多为暗棕色针叶林土,植被覆盖系兴安植物区系,主要树种为兴安落叶松林,此外还有樟子松、白桦和云杉等。该区域属寒温带大陆性季风气候,从(东)南至(西)北年平均气温由-1—0℃降低到-5—-5℃,气温年较差由35℃增加到52℃,年降水量由500—700 mm降低到200 mm以下[20-21]。

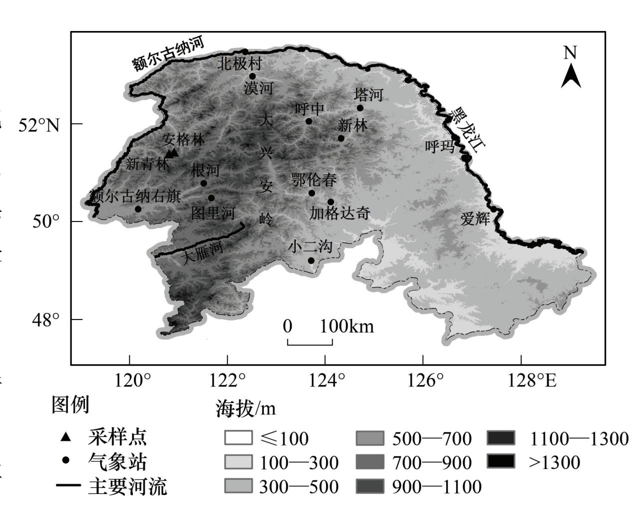


图1 大兴安岭北部地理位置及气象站点和采样点示意图

Fig.1 Illustration of the geological position of northern Da Hinggan Mountain and distributions of meteorological stations and samping points

本研究大兴安岭北部的气候资料为1707—2014年(308a),气候要素为年(当年4月—次年3月)平均气温、降水量和日照时数。具体分3段组成:1707—1960年气候资料(研究区无气象器测资料),由采自大兴安岭北部安格林(51°25′12″N,120°54′51″E)和新青(51°23′3″N,120°48′38″E)林场树轮宽度资料与额尔古纳市气象站(50°15′0″N,120°10′48″E)和根河气象站(50°46′48″N,121°31′12″E)观测资料计算反演获得;1961—2007年气候资料为安格林和新青2个树轮宽度反演站点与13个气象站观测资料的15个站点平均值(增加站点密度);2008—2014年为13个气象站观测资料的平均值。由于北极村站建站较晚,且资料序列不完整被剔除(比对使用)。

目前,本研究组基于标准树轮年表反演1707—2007年气象资料研究[22]认为,树轮宽度与气象要素建立的定量关系通过了可信度的检验及拟合与预报误差检验,并且对308年气象资料序列进行了一致性的检验,本文相对气象资料具体数值来说,更关注由气象资料序列长度、获取资料的密度及气象要素的波动变化过程,以及估算区域气候生产潜力的变化特征。因此,本文处理的气象资料序列符合树轮代用气象资料技术要求,

认为此气象资料序列具有一定的可靠性。树轮采样点和气象站点分布见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 气候生产潜力模型

目前,国内外研究气候生产潜力方法较多,并建立了一些比较成熟的模型,如 Miami 模型、AEZ 模型、Thornthwaite Memorial 模型和 Wagenigen 模型等。经文献比较和试验研究[4,15-17],认为 Miami 模型考虑了气温和降水因子;Thornthwaite Memorial 模型是 Miami 模型的发展和完善,核心理论是通过综合气象指标蒸散量模拟植物生物量,体现了植被生产潜力主要受气候资源变化的影响机理;迈阿密模型建立条件,在自然环境条件下,主要针对自然森林草原植被,利用五大洲 53 个地点的气象资料,获得的气象因子模拟自然植被生物量的关系表达式即气候生产潜力,之后中国学者利用 600 个左右气象站资料对模型验证认为,模型适合中国自然植被气候生产潜力研究应用。因此,本文采用 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型相结合估算大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其变化。

Miami 模型[13]为:

$$W_T = 30000/(1 + e^{1.315-0.119T})$$

$$W_R = 30000(1 - e^{-0.000664R})$$

式中,T 为年平均气温(℃);R 为年降水量(mm);W_T、W_R表示由年平均气温、年降水量决定的生产潜力(kg hm^{-2} a^{-1})。

Thornthwaite Memorial 模型[13-14]为:

$$W_V = 30000(1 - e^{-0.0009695(V-20)})$$

式中,W_V为蒸散量决定的植物干物质产量(kg hm^{-2} a^{-1}),V 是年平均实际蒸散量(mm),可用下式计算:

$$V = 1.05/[1 + (1.05R/L)^2]^{1/2}$$

式中,L 为年平均最大蒸散量(mm),它是年平均温度 T 的函数,L 与 T 之间存在如下关系:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

采用 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型估算气候生产潜力时,根据 Liebig 定律取较低值做气候生产潜力标准值(W)。在实际工作中,W 为研究区域森林植被气候生产潜力,即从 W_T、W_R、W_V中挑取同年生产潜力最小值,可用下式表达:

$$W = \min(W_T, W_R, W_V)$$

1.2.2 EOF 经验正交函数

EOF 经验正交函数又称为主分量分析方法,在对变量场特征进行分解时能将多个变量大部分信息最大限度地集中在有限个独立变量的主分量上,即将 m 个空间点 n 次观测值构成变量 $X_{m\times n}$分解为 P 个空间特征向量和对应的时间权重系数的线性组合:$X_{m\times n} = V_{m\times p}T_{p\times n}$

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & \Lambda & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \Lambda & 0 \\ M & M & \Lambda & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda & 0 \end{vmatrix}$$

$$A = X\,X^T$$

$$V^T A V = \wedge,$$

式中,V、$\wedge$ 分别是 A 阵特征向量组成的正交阵(即空间函数)和特征值组成的对角阵。时间函数满足 $T\,T^T = \wedge$,则 $T = V^T \times X$。本文用于分析森林植被气候生产潜力空间变化特征。

1.2.3 气候倾向率方法

大兴安岭北部气候序列的气候倾向率研究,即以年代 t 为时间因子,气候要素 x 为模拟对象,建立 x 与 t 之间的线性回归方程:$x(t) = c + bt$,c,b 为待定系数,其中 b 为气候要素趋势,若 $b>0$ 表示气候要素呈上升趋

势,$b \leqslant$ 表示气候要素呈下降趋势,$b \times 10$ 称为气候倾向率。本文用于研究森林植被气候生产潜力时间变化特征。

1.2.4　小波分析方法

令满足一定条件的小波函数 $\Psi(t)$,时间序列 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

式中,$W_f(a,b)$ 称为小波变换或小波系数,$\bar{\Psi}(t)$ 为 $\Psi(t)$ 的复共轭函数,$a>0$ 为频率参数,反映小波周期长度,b 为时间参数,表示波动在时间上的平移。$W_f(a,b)$ 随参数 a,b 变化。$W_f(a,b)$ 的二维不同时间尺度下的小波系数可以反映系统在该时间尺度(周期)下的变化特征[23-25]。

墨西哥帽小波函数(Mexican Hat Function)形式如下:

$$\psi(t) = (1 - t^2)\, e^{(-t^2/2)}$$

为了判断各序列的主要周期,即对气候生产潜力序列变化起主要作用的周期,采用小波方差检验:

$$W_P(a) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_f(a,b) \right|^2 db$$

式中,$W_p(a)$ 为小波方差。在一定的时间尺度下,小波方差表示时间序列在该尺度中周期波动的强弱,对应峰值处的尺度即为该序列的主要时间尺度,即主要周期。

2　结果与分析

2.1　大兴安岭北部森林植被气候生产潜力变化特征

2.1.1　年代际变化特征

由图 2 和表 1 显示,气候生产潜力在 308a 时间序列变化中,气温、降水和蒸散生产潜力变化趋势一致,均表现极显著增加趋势($P \leqslant 0.001$),气候倾向率分别为 2.14、1.23 kg hm^{-2} a^{-1}和 1.87 kg hm^{-2} a^{-1}。在世纪尺度的变化中,18 世纪(1707—1799 年)、19 世纪(1800—1899 年)每 100 年 3 种生产潜力变化不明显,但均有微弱增加趋势;20 世纪(1900—1999 年)、21 世纪初(2000—2014 年)3 种生产潜力变化增加趋势一致,20 世纪

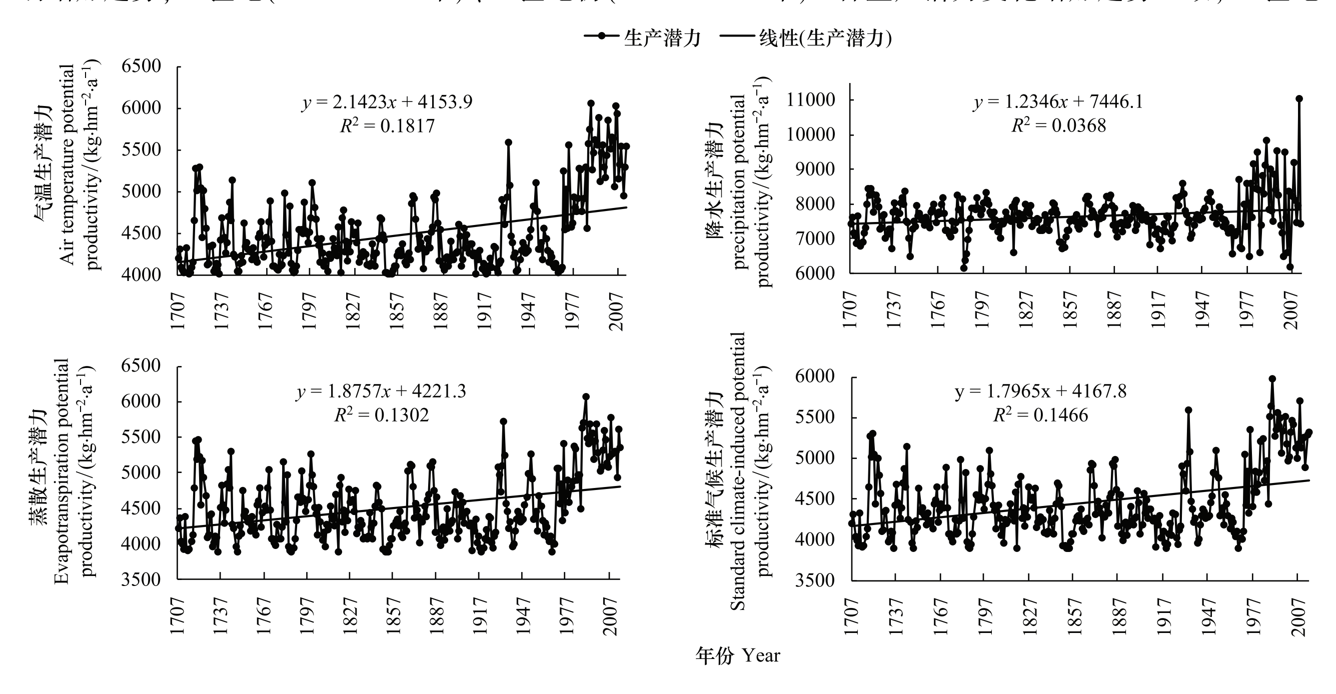


图 2　1707—2014 年大兴安岭北部森林植被气候生产潜力变化曲线

Fig.2　The changing curves of climate-induced potential productivity in northern Da Hinggan Mountain from 1707—2014

表现极显著增加趋势($P \leqslant 0.001$),2 个时期 W_T、W_R、W_V气候倾向率分别为 11.42、9.02、10.92 kg hm^{-2} a^{-1}和 13.22、104.95、10.74 kg hm^{-2} a^{-1};从 18 世纪开始到 21 世纪初期 3 种气候生产潜力由大到小排列,W_T和 W_V均为 21 世纪>20 世纪>18 世纪>19 世纪,W_R为 21 世纪>20 世纪>19 世纪>18 世纪,但 18、19 世纪基本没有变化;且同一时期 W_R值最大,W_T、W_V值大小相当。标准气候生产潜力(W)在 308 年的变化趋势与上述 3 种生产潜力变化趋势一致,表现为极显著增加趋势($P \leqslant 0.001$),平均值 4445 kg hm^{-2} a^{-1},最大 5974.5 kg hm^{-2} a^{-1},最小 3887.4 kg hm^{-2} a^{-1},气候倾向率为 1.79 kg hm^{-2} a^{-1},变化最显著的是 20 世纪,气候倾向率为 10.14 kg hm^{-2} a^{-1}。水热配比情况,18 世纪、19 世纪、20 世纪、21 世纪初期 4 个时期 W_T与 W_R的比值分别为 0.579、0.573、0.593、0.691,这个比值的大小可以反映各个时期研究区的水热配比情况好坏,可以认为大兴安岭北部 21 世纪的水热配比状态最好,20 世纪的水热配比状态较好,而 18 世纪和 19 世纪的水热配比一般,量值相当,但状态相对稳定,之后有逐渐趋好的态势。

表 1　大兴安岭北部 1707—2014 年气候生产潜力的百年变化(kg hm^{-2} a^{-1})

Table 1　Variation of climate-induced potential productivity in northern Da Hinggan Mountain over different centuries from 1707—2014

时段/年份 Time	气温生产潜力 Air temperature potential productivity			降水生产潜力 Precipitation potential productivity			蒸散生产潜力 Evapotranspiration potential productivity			标准气候生产潜力 Standard climate-induced potential productivity			W_T/W_R
	平均值	倾向率	R^2	平均值	倾向率	R^2	平均值	倾向率	R^2	平均值	倾向率	R^2	水热配比
1707—1799	4382	0.55	0.0022	7569	0.92	0.0028	4425	0.92	0.0038	4360	0.66	0.0027	0.579
1800—1899	4337	0.47	0.0033	7571	0.52	0.0019	4381	0.54	0.0026	4323	0.50	0.0032	0.573
1900—1999	4578	11.42	0.4137 ***	7723	9.02	0.1589 ***	4601	10.92	0.3593 ***	4529	10.14	0.3641 ***	0.593
2000—2014	5471	13.22	0.0338	7912	104.95	0.1378	5305	10.74	0.0415	5222	4.79	0.0099	0.691
1707—2014	4484	2.14	0.1817 ***	7636	1.23	0.0368 ***	4511	1.87	0.1302 ***	4445	1.79	0.1466 ***	0.587

* 通过 0.05 信度检验, * * 通过 0.01 信度检验, * * * 通过 0.001 信度检验

2.1.2　周期变化特征

小波分析显示,大兴安岭北部 1707—2014 年 4 种气候生产潜力存在不同时间尺度的周期变化特征(图 3),这种变化主要体现在 215—219、136—138、76—79、30—38 年等 4 种时间尺度的周期变化,反映了大兴安岭北部 4 种气候生产潜力周期变化的一致性。进一步分析表明,W、W_T、W_R、W_V 4 种气候生产潜力小波方差的主要峰值分别出现在尺度 218、215、218、219a 处,最高峰值为尺度 218、215、218、219a 所对应的小波方差,说明 W、W_T、W_R、W_V 4 种气候生产潜力依次为 218、215、218、219a 左右的周期振荡最强,为第一主周期,第二主周期分别为 138、138、136、138a,第三主周期分别为 79、79、76、79a,第四主周期分别为 32、30、38、31a。这 4 个周期波动控制着整个时域内的 4 种气候生产潜力变化特征。

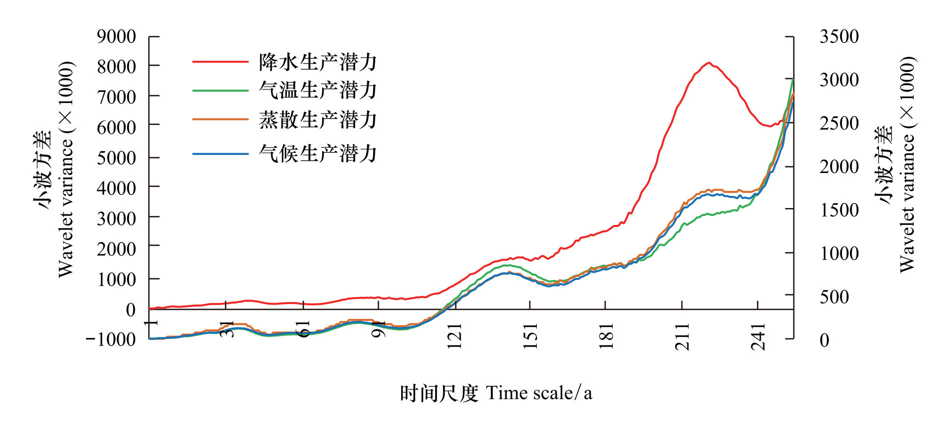


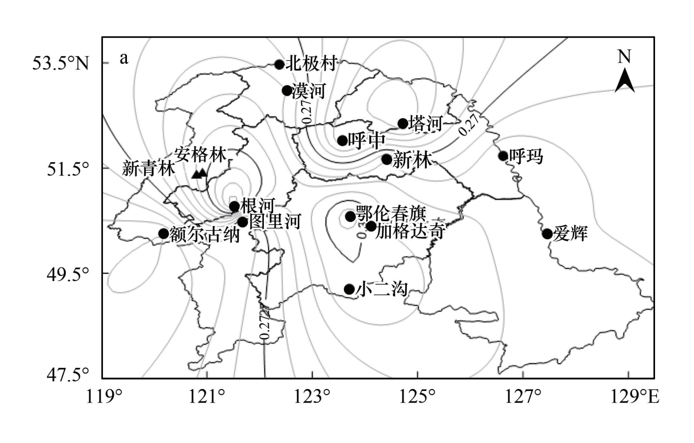
图 3　1707—2014 年大兴安岭北部森林植被气温、降水、蒸散、标准气候生产潜小波方差图

Fig.3　The wavelet variances of air temperature、precipitation、evapotranspiration and standard climate-induced potential productivity of forest vegetation in northern Da Hinggan Mountain from 1707—2014

2.1.3 空间变化特征

EOF 分析得出研究区标准气候生产潜力(*W*)的前 3 个特征向量的方差贡献依次为 74.93%、7.72%、4.68%,累计方差贡献为 87.33%,因此,可以反应该区域气候生产潜力(*W*)的空间分布特征。

第 1 特征向量方差贡献率为 74.93%,体现区域气候生产潜力变化的显著空间分布状态。图 4 表明,大兴安岭北部 *W* 呈现一致的正变化趋势,区内高值中心在根河附近且等值线密集,次高值中心在塔河附近且等值线较密集,低值中心在鄂伦春偏南地区且等值线相对稀疏,其振幅由西北部地区向东南部地区逐渐递减,*W* 受地理环境影响变化很大,区域特征差异显著,气温与降水匹配状况较好的地区气候生产潜力相对偏高,同时反映了森林植被状况地域性明显,偏北地区森林植被生长茂盛,原始森林景观保持较好,偏南地区则为次生林植被占主导地位。第 1 特征向量所对应的时间序列图 4 表征的研究区域气候生产潜力年际趋势变化,可以看出第 1 特征向量的时间系数绝对值最大,在 14—21 之间,表示这一时刻分布型式最典型。



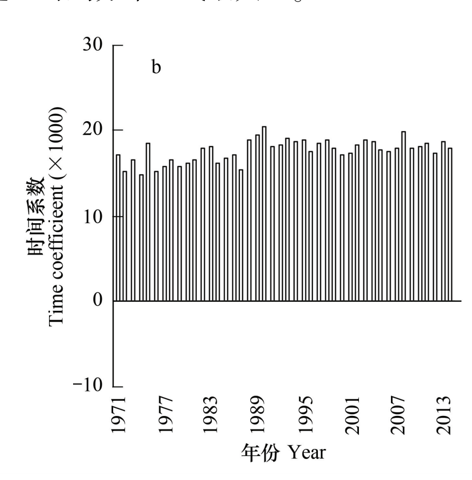
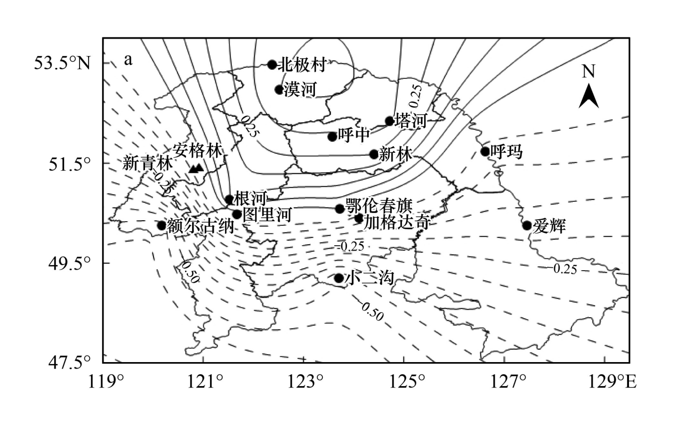


图 4 大兴安岭北部气候生产潜力第 1 特征向量(a)和时间系数(b)

Fig.4 The first eigenvector field (a) and time coefficitent (b) of climate-induced potential productivity in northern Da Hinggan Mountain

第 2 特征向量方差贡献率为 7.72%,也是区域气候生产潜力一种较显著的空间分布状态。图 5 显示,大兴安岭北部 *W* 呈现正、负相间的变化趋势,区内高值中心在额尔古纳附近,中心绝对值在 0.58 以上,低值中心在图里河附近。额尔古纳、小二沟、呼玛、加格达奇和爱辉第 2 特征向量均为负值,其他为正值,说明其气候生产潜力变化呈相反位相的分布型式。这种分布类型,突出呈现了 *W* 更小地理单元分布状况差异,气温偏低,降水量相对较多匹配类型导致标准气候生产潜力偏低。图 5 可以看出特征向量时间系数绝对值在 0—2 之



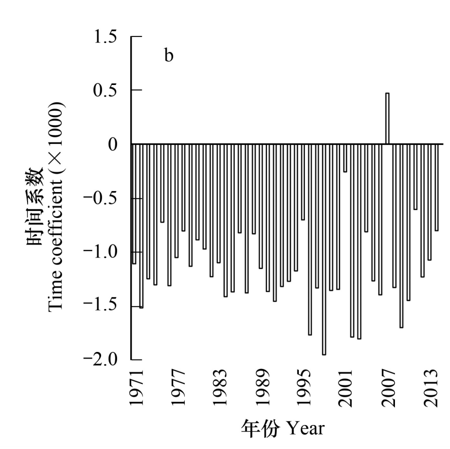
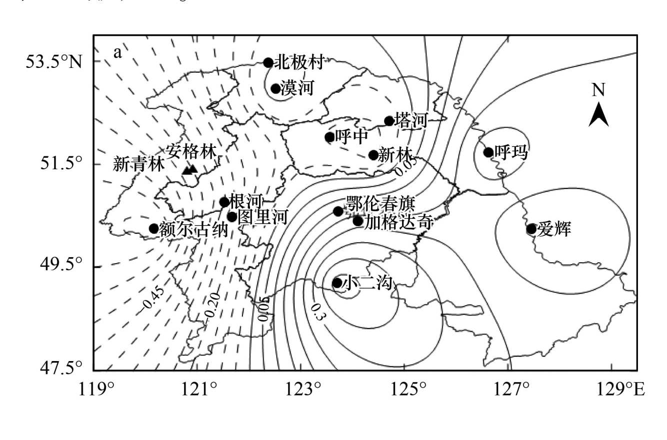


图 5 大兴安岭北部气候生产潜力第 2 特征向量(a)和时间系数(b)

Fig.5 The second eigenvector field (a) and time coefficient (b) of climate-induced potential productivity in northern Da Hinggan Mountain

间,除 2007 年为正值外,其余年份均为负值,则表明额尔古纳、小二沟、呼玛、加格达奇和爱辉气候生产潜力偏高(低)的一致性,气候生产潜力分布型式相反特征明显。

第 3 特征向量方差贡献率为 4.68%,对区域气候生产潜力空间分布具有一定的指示意义。图 6 表明,大兴安岭北部 W 呈现一致的正变化趋势,与第 1 特征向量空间模态相似,只是等值线密集程度降低,区内高值中心在额尔古纳附近,低值中心在漠河附近。图 6 可以看出时间系数绝对值最小,但均为正值,表明气候生产潜力分布型式较典型。



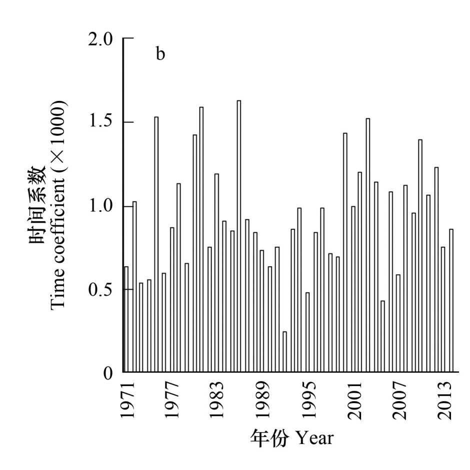


图 6　大兴安岭北部气候生产潜力第 3 特征向量(a)和时间系数(b)

Fig.6　The third eigenvector field (a) and time coefficient (b) of climate-induced potential productivity in northern Da Hinggan Mountain

2.2　大兴安岭北部森林植被气候生产潜力对气候变化的响应

2.2.1　气象因子与气候生产潜力的关系

为了确定影响研究区气候生产潜力(W)的关键气象因子,研究 W 对气温、降水、蒸散量变化的响应,确定气温、降水和蒸散量对 W 的影响程度。图 7 表明,大兴安岭北部地区逐年 W 与年气温、年降水量、年蒸散量的变化趋势一致,相关系数分别为 0.988、0.996、0.707,均通过 0.001 的信度检验。W 与年气温、年降水量、年蒸散量定量正相关关系显示,即年平均气温每升高 1℃、年降水量和蒸散量均增加 10 mm,W 变化率依次为 453.71、74.40、219.01 kg/hm^2。由此可以确定,在大兴安岭北部地区气温对 W 的影响占主导地位,其次是蒸散量,降水量对 W 的影响相对较小。

2.2.2　气候生产潜力对气温和降水量变化的敏感性分析

为了分析气象因子协同作用对气候生产潜力的影响,研究 W 与年平均气温、年降水量间的定量关系,建立多元回归、生长模型、逻辑斯蒂模型,检验与拟合效果最好的多元回归方程:

$$W = 409.105T + 1.658R + 5189.038 \ (R = 0.996)$$

方差分析中得知,F 统计量值为 19667.52,显著性概率 $P<0.001$,回归方程相关非常显著,且呈正相关关系,拟合平均相对误差<10%的占总样本的 86.7%。

为了模拟气候生产潜力对多年平均气温、降水量变化的敏感程度。本文设置五种气候情景,由于研究区域处于高纬度地区,太阳能丰富,日照充足,可以完全满足植物生长发育需求,故以多年平均气温、降水量计算气候生产潜力即可。并分别将年平均气温升高或降低 1 ℃或 2 ℃及气温不变,年降水量增加或者减少 10%或 20%及降水量不变后计算气候生产潜力,比较气候变化前后的大兴安岭北部地区标准气候生产潜力变化。从表 2 中可以看出,大兴安岭北部标准气候生产潜力(W)随气温和降水的变化而变化。考虑单一因子变化的情况,气温升高时,W 的递增幅度要比降水增加时大。降水减少时,W 的减少幅度比气温降低时小。事实上气温和降水经常同时发生变化,对 W 产生综合影响。当气温正常时,降水量增加(减少)10%、20%,W 分别增加(减少)1.64%、3.29%;当降水量正常时,气温升高(降低)1℃、2℃,W 分别增加(减少)8.83%(9.57%)、18.03%(18.77%)。降水量正常而气温变化引起的 W 变化幅度大于气温正常而降水量变化引起的 W 变化幅

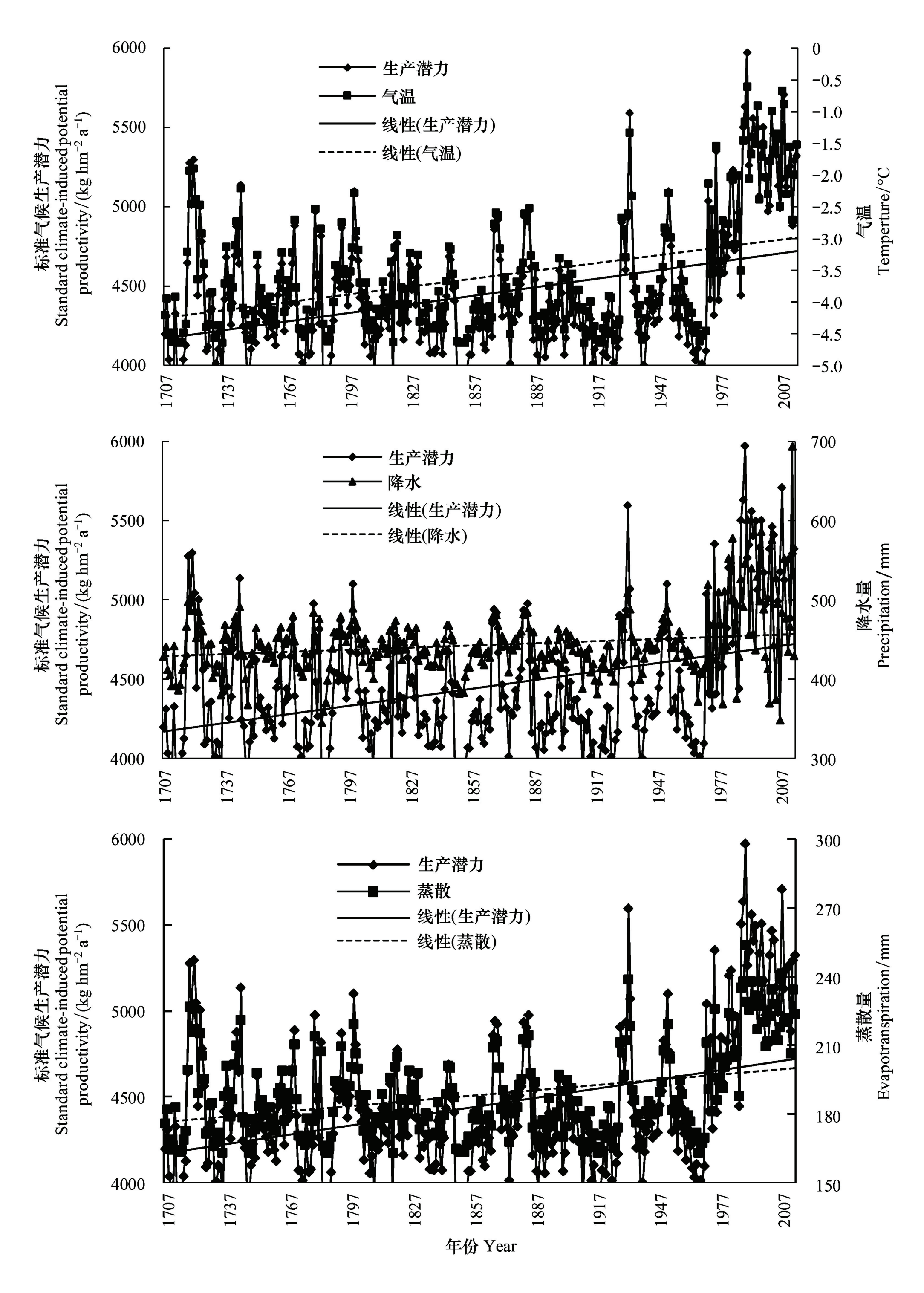


图 7 大兴安岭北部区域气候生产潜力与气象因子的关系

Fig.7 The relationship between climate-induced potential productivity and metemorological factors in northern Da Hinggan Mountain

度,说明在大兴安岭北部 *W* 的多少由气温主导。当气温升高(降低)1℃、2℃,降水增加(减少)10%、20%时,气候为“暖湿型”和“冷干型”,*W* 增加(减少)相当,均为 10.85%—21.69%;反之,当出现气温降低(升高)1℃、2℃,降水量增加(减少)10%、20%的“冷湿型”和“暖干型”气候时,*W* 减少和增加幅度相同,均为 5.91%—16.76%。与之前结论,气温对 *W* 的影响占主导地位完全一致。值得注意,在大兴安岭北部,“暖湿型”气候对森林植被生长十分有利,而“冷干型”气候不利于森林植被的生长。根据大兴安岭北部气候变化的特征和趋

势及文献认为[26],未来气候变化有向“暖湿型”气候方向发展迹象,这有利于提高大兴安岭北部气候生产潜力,若气温升高 1—2℃,降水量增加 10%—20%,大兴安岭北部森林植被气候生产潜力将增加 10.9%—21.7%。

表 2　大兴安岭北部年平均气温和年降水量变化背景下气候生产潜力的变化

Table 2　The variation of climate-induced potential productivity against annual average temperature and precipitation change in northern Da Hinggan Mountain

气温 Temperature/℃	降水量 Precipitation/mm				
	-20	-10	0	10	20
-2	-21.69	-20.5	-18.77	-16.76	-15.11
-1	-12.49	-10.85	-9.57	-7.56	-5.91
0	-3.29	-1.64	0	1.64	3.29
1	5.91	7.56	8.83	10.85	12.49
2	15.11	16.76	18.03	20.05	21.69

3　讨论

尽管 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型充分考虑了光、温、水等条件对植被生物量积累的综合影响,通过植物冠层蒸散与光合作用相伴随的植物体对植物生长的机理以及能量的内在转换机制进行了描述,表征了植被产量与其光合作用之间的关系,即蒸发作用愈强,光合作用也愈强,植被生物量的累积量也愈大。显然,利用该模型通过气温、降水和多个气象要素综合的蒸散量资料来讨论气候变化对植物产量的影响十分方便,同时基于各站点及较小区域逐年的气候生产潜力可以分析植被气候生产潜力的时空演变特征,进而探讨气候变化的不稳定性对气候生产潜力的影响。因此,Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型便成为气候生态领域估算陆地生态系统气候生产潜力的经典模型之一,在不同类型的植被生物量模拟研究中被广泛应用[15,27],该模型对评价、评估植物的气候生产潜力、模拟不同类型植被生长、研究陆面生态系统演变过程与气候的相互作用和预测生态环境的变化等方面,起到了极大的促进作用。但需要指出的是,该模型为统计模型,在实际应用中只是植被生产力与环境因子的简单回归,缺乏严密的生理、生态特征及机理支撑依据,由于尺度扩展而带来生理与环境的相互作用的反馈机制的变化异常复杂,且由于气温与降水的时间分布格局对于不同植被生物量积累具有重要影响,不同的温湿因子及其组合会产生完全不同的生态效应,若要利用 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型深入探讨气候变化对不同类型植被生产潜力的影响机制,还需从修订和改进气候生产潜力模型入手,精选其他气象因子,诸如日照时数、相对湿度、风速及土壤温湿因子等、土壤性质、大气二氧化碳浓度以及表征植物的生物学因子[28],完善 Miami 模型和 Thornthwaite Memorial 模型,使之成为研究陆地生态系统气候生产潜力的机理模型。这是未来一段时期研究的重要任务之一。

对于大兴安岭气候变化敏感区而言,森林植被和气象实测资料难以获得,限制了区域气候变化与生态系统相互作用机理的研究。从气象数据方面来说,由于所需的气温、降水量等数据采用地面观测点常规气象资料或由树木年轮资料通过气候学方法计算并插值得到[1]。一方面,特别是树轮代用资料定年误差和代用指标的指示意义及其定量程度等因素影响,另一方面,在这个从点到面的过程中,不可避免地产生由于尺度转换所造成的误差。这在一定程度上导致百年尺度和区域尺度气候变化及其影响的差异,也反映了长序列资料重建结果的不确定性[1,28-29]。这无疑给模拟植被气候生产潜力造成较大的困扰。因此,深入挖掘森林植被和气象基础数据显得十分重要,继续获取高精度树轮代用资料,由历史文献分析、原始潜在植被恢复和驱动力分析的方法进行重建的、订正的过去 300 年以上森林植被变化数据,改进气候变化资料序列重建技术方法,降低重建结果的不确定性[26,29],研究工作还需要从模型的参数化、区域尺度的观测和数据获取转换等方面得以改进和完善。才能深入研究区域气候变化与生态系统相互作用的机理,进而揭示森林植被气候生产潜力的演变特征,仍是本领域研究努力的一个主要方向。

4 结论

大兴安岭北部森林植被气候生产潜力年代际变化特征显著,1707 年以来,气温、降水、蒸散和森林植被气候生产潜力变化均表现极显著增加趋势,W 变化率为 1.79 kg hm^{-2} a^{-1},20 世纪气候倾向率最大为 10.14 kg hm^{-2} a^{-1},W、W_T/W_R 值由大到小排列均为 21 世纪>20 世纪>18 世纪>19 世纪,21 世纪水热配比状态最好,20 世纪水热配比状态较好,而 18 世纪和 19 世纪的水热配比一般,量值相当,但状态相对稳定,之后有逐渐趋好的态势;W、W_T、W_R、W_V 4 种气候生产潜力确实存在不同时间尺度的显著周期变化,第一主周期分别为 218、215、218、219a,第二主周期分别为 138、138、136、138a。

大兴安岭北部 W 空间分布主要特征呈现一致的正变化趋势,存在 3 种分布类型,突出表现为高值、次高值、低值中心分别在根河、塔河及鄂伦春偏南地区,振幅由西北向东南逐渐递减,W 受地理环境影响变化很大,区域特征差异显著,气温与降水匹配状况较好(较差)的地区气候生产潜力相对偏高(偏低),森林植被分布状况地域性明显。

大兴安岭北部森林植被气候生产潜力对气候变化响应敏感,年气温、降水量、蒸散量,年平均气温每升高 1℃、年降水量和蒸散量均增加 10 mm,W 变化率依次为 453.71、74.40、219.01 kg/hm^2,气温是影响 W 的主要因子;未来"暖湿型"气候对森林植被生长有利,而"冷干型"气候对森林植被生长不利,气候生产潜力增加(减少)幅度较大,一般在 10%以上。研究区未来气候变化有向"暖湿型"气候方向发展迹象。

致谢:感谢中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所袁玉江和张同文两位老师对树木年轮宽度获取给予的支持。

参考文献(References):

[1] 王萍. 基于 IBIS 模型的东北森林净第一性生产力模拟. 生态学报, 2009, 29(6): 3213-3220.

[2] 潘磊, 肖文发, 唐万鹏, 雷静品, 史玉虎, 黄志霖, 曾立雄, 庞宏东. 三峡库区森林植被气候生产力模拟. 生态学报, 2014, 34(11): 3064-3070.

[3] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 92-102.

[4] 罗永忠, 成自勇, 郭小芹. 近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征. 生态学报, 2011, 31(1): 221-229.

[5] Kauppi P E, Mielikäinen K, Kuusela K. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. Science, 1992, 256(5053): 70-74.

[6] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 72-86.

[7] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin Heidelberg: Springer, 1975: 251-300.

[8] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.

[9] 刘世荣, 代力民, 温远光, 王晖. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 2015, 35(1): 1-9.

[10] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 张学珍, 方修琦, 王欢, 闫军辉. 过去 2000 年中国气候变化研究的新进展. 地理学报, 2014, 69(9): 1248-1258.

[11] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究.植物生态学报, 1996, 20(1): 11-19.

[12] PAGES 2K Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. Nature Geoscience, 2013, 6: 339-346.

[13] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world//Lieth H, Whittaker R H, eds. Primary Productivity of the Biosphere. Berlin Heidelberg: Springer, 1975: 237-263.

[14] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations (1): Chikugo model for evaluating net primary productivity. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40(4): 343-352.

[15] 赵慧颖, 顾润源, 白晓慧, 李翀, 王彦平, 宋卫士. 气象水文因子对呼伦湖湿地区域植物气候生产潜力的影响. 生态环境学报, 2012, 21(6): 997-1003.

[16] 李莉, 周宏飞, 包安明. 中亚地区气候生产潜力时空变化特征. 自然资源学报, 2014, 29(2): 285-294.

[17] 于颖, 范文义, 杨曦光. 1901—2008 年小兴安岭森林 NPP 估算. 林业科学, 2014, 50(10): 16-23.

[18] 荆立新. 大兴安岭林区发展林业生态经济的意义、概况及对策. 商业研究, 2008, (12): 131-133.

[19] 杨光, 舒立福, 邸雪颖. 气候变化背景下黑龙江大兴安岭林区夏季火险变化趋势. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3157-3163.

[20] 王晓莉, 常禹, 陈宏伟, 胡远满, 冯玉婷, 吴文, 焦琳林. 黑龙江省大兴安岭主要森林生态系统生物量分配特征. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1437-1444.

[21] 伏鸿峰, 闫伟, 陈晶晶. 内蒙古大兴安岭林区森林碳储量及其动态变化研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 166-170.

[22] 曲辉辉, 赵慧颖, 宫丽娟. 大兴安岭北部典型地区 300 年来气候资料反演研究. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3):439-444.

[23] 赵宗慈, 罗勇. 21 世纪中国东北地区气候变化预估. 气象与环境学报, 2007, 23(3): 1-5.

[24] 李淼, 夏军, 陈社明, 孟德娟. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011.

[25] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961-2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报, 2013, 33(2): 519-531.

[26] 郭佩佩, 杨东, 王慧, 程军奇. 1960—2011 年三江源地区气候变化及其对气候生产力的影响. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2806-2814.

[27] 左舒翟, 任引, 王效科, 张小全, 罗云建. 中国杉木林生物量估算参数及其影响因素. 林业科学, 2014, 50(11): 1-12.

[28] 葛全胜, 刘健, 方修琦, 杨保, 郝志新, 邵雪梅, 郑景云. 过去 2000 年冷暖变化的基本特征与主要暖期. 地理学报, 2013, 68(5): 579-592.

[29] 李士成, 何凡能, 张学珍. 中国历史时期森林空间格局网格化重建方法研究——以东北地区为例. 地理学报, 2014, 69(3): 312-322.